

레이저 절단

한 유 희

한국기계연구원 레이저기술연구그룹

1. 레이저 절단 원리

레이저 절단의 원리는 다음과 같다. 레이저 빔이 렌즈 또는 거울에 의해 물체표면에 초점을 형성하여 국부적으로 가열하면 순간적으로 용융 내지 증발 현상을 초래해 이를 가스제트로 불어내면 절단이 이루어진다.

절단 과정에서 공구와 가공물간의 접촉이 없으며, 따라서 기계적인 힘이 가공물에 작용하지 않는다. 그러므로 공구의 마모현상이 없다.

레이저 빔은 초점의 크기가 마이크로미터 범위까지 수렴될 수 있으며 이러한 훌륭한 초점 형성 능력으로 인해 에너지의 밀도를 높일 수 있다. 따라서 레이저 절단은 다른 절단 방법에 비해 절단 속도가 빠르다. 동시에 가공물이 받는 열량이 적어 열변형 또는 조직변화 등이 극히 적다. 레이저 절단원리를 (그림 1)에서 나타낸다. (그림 2)에서는 절단 방법에 따른 절단폭 및 열 영향부가 비교되었다.

레이저 절단면의 특징은 가공물 표면에 거의 수직으로 절단면이 형성된다는 점과 낮은 표면 거칠기, 그리고 열영향부(HAZ)가 작다는 점을 들 수 있다. 따라서 대부분의 경우 절단후 마감 가공이 필요없다. 절단면의 최적조건은 아래 (1)의 고정변수들을 적정화함으로써 얻을 수 있다.

$$Q=f(G,F,L,P) \dots\dots\dots(1)$$

Q : Quality

G : Cutting Gas

- Nozzle형상
- Nozzle과 가공표면간의 거리
- 가스압력 및 종류(예, 혼합가스)

F : Focussing

- Intensity
- Spot size
- Focal length(초점거리)

L : 레이저

- Power

- 빔 mode
 - Polarization
 - Divergence
- P: Process
- Speed
 - 재료두께
 - 재료(화학적 조성)

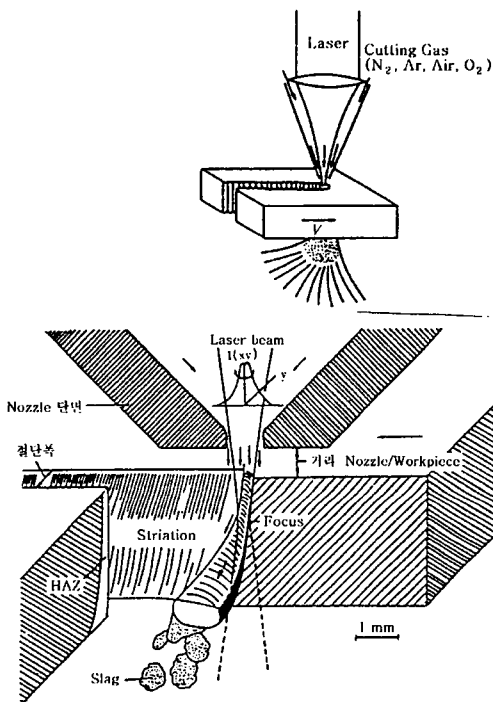


그림 1. 레이저 절단 원리

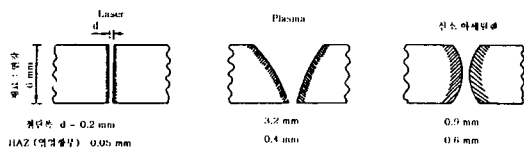


그림 2. 절단 방법에 따른 절단폭 및 열영향부 비교

2. 절단용 레이저

절단용으로는 현재 주로 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 사용된다. 이들 레이저는 연속 발진 (cw : Continuous Wave)과 펄스기능을 갖는다.

CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저는 빔의 파장에

서 차이가 난다(CO₂:10.6 μ m, Nd:YAG:1.06 μ m). 따라서 수렴성에서 차이가 난다. 같은 모드의 빔일 경우, Nd:YAG 레이저는 초점깊이와 초점크기 (spot size)에서 CO₂ 레이저 보다 10배나 우수하다. 이와 같은 장점으로 인해 Nd:YAG 레이저는 주로 정밀가공에 사용된다. CO₂ 레이저 사용영역은 수백 W에서 수 kW의 출력을 요하는 가공에 사용된다.

Nd:YAG 레이저는 현재 수 kW급이 일부 사용되고 있으나 통상 수백 W급까지의 레이저가 널리 사용되고 있고, CO₂ 레이저에서는 수 kW의 출력과 함께 빔 quality도 좋은 레이저가 생산되고 있다.

빔의 파장이 다름으로 해서 흡수율이 다르게 된다. 파장에 따른 빔이 갖는 특성(초점심도, spot size 그리고 흡수율)을 고려할 때 자외선을 내는 excimer 레이저가 재료 가공에 가장 적합할 것이라는 추측이 든다. 자외선을 발생시키는 excimer 레이저는 현재 $\lambda=351\text{nm}$ (XeF*)와 $\lambda=193\text{nm}$ (ArF*)사이의 파장을 내며 평균출력이 수백 W급까지 있으며, 펄스 rate는 10~1000Hz 정도이다.

수 μ m범위의 정밀제거 또는 정밀절단 이외에 excimer 레이저를 금속가공에 응용하기에는 아직도 비경제적이므로 사용되는 경우가 거의 없다. 이는 펄스길이가 너무 짧은데 기인한다고 하겠다. 그러므로 현재 절단용으로는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 사용되고 있다.

3. 절단공정

레이저 절단은 다음의 3가지 공정방법으로 나눌 수 있다.

- ① 승화절단 (sublimation cutting)
- ② 용융절단 (fusion cutting)
- ③ 연소절단 (oxygen assisted cutting)

각 절단 공정의 특징과 장단점은 아래와 같다.

3.1 레이저 승화절단(레이저 sublimation cutting)

승화절단에 있어서 절단부 (cutting front)가 레이저 빔에 의해 승화된다. 목재, 종이, ceramic 그리고 plastic 등 용융상태를 거의 거치지 않고 승화되는 재료들의 경우에 적용된다. 첫째, 연소현상을 방지하기 위해 보호가스(shielding gas)를 사용하여야 한다. 둘째, 빔의 intensity를 최대한 높여 열전도에 의한 손실을 최소화하는 것이 승화절단에 요구된다.

① 장점

- 용융현상이 일어나지 않게 함으로써 striation이 형성되지 않아 절단면이 매끈하다.
- 열영향부(HAZ)가 거의 없으며 따라서 열 변형 또한 없다.
- 연소현상이 없으므로 해서 산화막이 없게 되어 후가공이 필요 없다.

② 단점

- 높은 빔 intensity를 필요로 하므로 CO₂ 레이저의 경우는 통상 펄스를 사용해야 한다. intensity가 높은 관계로 plasma가 형성되기 쉽고 따라서 plasma제어 필요성이 있게 된다.
- 금속의 경우는 승화열이 큰 관계로 절단 속도가 매우 느리다. 금속의 승화 절단에는 주로 Nd:YAG 레이저를 사용한다.

3.2 레이저 용융절단(레이저 fusion cutting)

레이저 용융절단은 글자 그대로 레이저 빔으로 절단부를 용융상태로 가열해서 절단 가스(cutting gas : N₂, Ar, He, 공기)로 제거하는 방법이다. 이 방법을 이용해서 유리, plastic 그리고 금속 등을 절단한다.

① 장점

- 승화온도까지 가열하지 않음으로 해서 승화

절단보다 절단속도가 빠르다.

- 금속의 경우에는 연소현상을 유발하지 않아 산화물/산화막의 형성을 방지한다.

② 단점

- 용융된 것을 제거하는 데에 일어나는 동적인 현상(dynamic behavior of melt)으로 인해 빗금(striation)이 형성되어 표면조도가 승화절단보다 커진다(그림 3).
- 열영향부(HAZ)가 다른 절단방법보다 커진다.
- 절단속도가 연소절단에 비해 느리다.

용융절단에는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 주로 사용되며 이때 cw 또는 펄스를 사용한다.

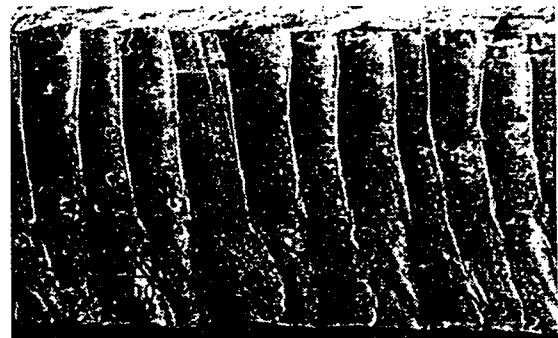


그림 3. 레이저 연소 절단면

3.3 레이저 연소절단(레이저 oxygen assisted cutting)

연소절단 방법은 거의 전적으로 금속절단에 사용된다.

절단부는 레이저 빔에 의해 가열되어 연소점(ignition temperature)이상이 되면 절단가스로 사용되는 산소와 산화/연소 반응을 하며 반응열이 생성되면서 slag가 형성되고, 형성된 slag는 산소 jet에 의해 제거된다. 산소 jet는 산화/연소에 일부 소요되고 slag제거에 사용된다. 연소절단방법에서는 연소반응에서 생성되는 반응열이 절단작용에 도움을 줌으로써 용융절단에 비해 약 6~8배정도 절삭속도가 빠르다.

① 장점

- 절단할 수 있는 두께가 다른 절단방법보다 크다.
- 경제적이다.

② 단점

- 산화막의 형성으로 간혹 문제점이 있다.
예) 절단 후 용접 또는 도색할 경우
- HAZ부분이 승화절단보다 크다.
- 연소현상과 slag/melt의 동적현상으로 인해 striation이 용융절단의 경우보다 크게 나타난다.

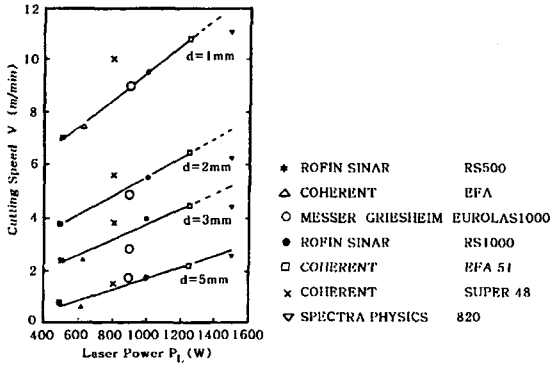


그림 4. 출력에 따른 절단 속도

연소절단에는 주로 CO₂ 레이저가 사용되며 이때 cw와 펄스를 사용한다. (그림 4)에 현재 사용되고 있는 CO₂ 레이저의 절단속도가 출력에 따라 각 재료두께마다 표시되어 있다. 이 data는 레이저 회사에서 발표한 자료라는 것을 밝혀둔다.

3.4 레이저 절단 변수(레이저 cutting parameter)

서론에서 이미 언급한 바와 같이 절단성에 영향을 주는 변수는 많다. 이들 변수를 종합해서 (그림 5)에 나타냈다. 세부 변수들을 한 묶음씩 대표 변수로 나타냈고, 이 대표변수들은 레이저 출력(레이저 power), 절단속도(cutting speed), 절단가스(cutting gas), nozzle형상, 재료, 재료 상태 등을 꼽을 수 있다.

적정한 절단 결과를 얻기 위해서는 적정변수를 도출해야 한다. 그러나 현재 각 변수들이 절단에

미치는 영향을 분리해서 규명할 수 있는 단계에 이르지 않고 있다. 이는 변수가 많고 또 변수들 상호간에 서로 영향을 끼침으로 해서 실험상 어려운 점이 많기 때문이라고 하겠다. 상호영향력은 단지 정성적으로 나타낼 수 있을 뿐이며, 정확한 함수적인 연관을 단지 큰 오차를 허용하는 범위에서 가능하다.

다음에는 변수들이 미치는 영향을 대표 변수별로 분류해 기술해 본다.

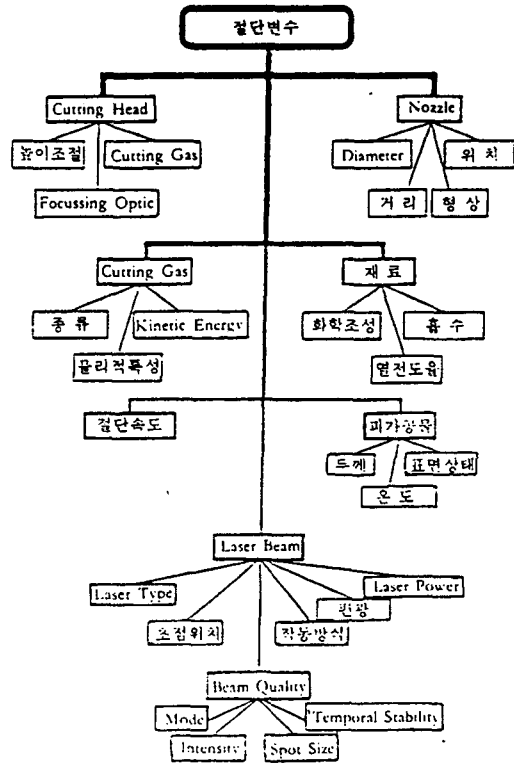


그림 5. 레이저 절단 변수

가. 레이저 빔 변수(레이저 빔 parameter)

위의 변수군에는 레이저 종류, 작동방법, 출력, 빔 quality, 초점크기, 그리고 초점 위치 등이 포함된다.

① 레이저 종류

절단용으로 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저를

사용할 수 있으며, 두 레이저의 차이와 특성은 앞에서 설명이 됐으므로 생략한다.

② 작동방법

레이저 작동방법, 즉 여기서는 시간에 따른 빔의 출력조절 방법을 의미한다. 우선 연속적으로 일출출력을 내는 cw방식과 출력을 변화시키는 pulses방식으로 나눌 수 있다. 펄스방식은 normal 펄스와 super 펄스로 크게 나눌 수 있다.

이외에 cw와 super 펄스조합, normal 펄스와 super 펄스의 조합을 들 수 있다. 각 작동 방법은 (그림 6)에 나타나 있다.

펄스방식은 에너지 유입량과 절단 속도를 조화시키는데 긴요하게 사용된다. 즉 절단방향이 바뀔 때, 예를 들어 모서리 가공을 할 경우 끝 부분에서 진행속도를 낮추어야 한다. 이는 관성에 의해 빔이 예정된 곳을 지나치지 않도록 하기 위해 속도를 감속한다. 이같은 속도변화에 상응해서 레이저 출력이 맞춰져야 한다.

펄스방식에서는 첨두출력(peak power)을 변화시키지 않고 평균출력을 감속해 따라 낮출 수 있다. 펄스 기능이 없는 레이저 system에서는 평균 출력을 낮추기 위해서는 peak power를 낮추어야 하므로 절단면 quality가 저하되는 결과를 낳게 된다.

Super 펄스는 평균출력이 낮지만 높은 첨두출력을 요구하는 가공재료(예: 유리, stainless steel)에 긴요하게 사용된다.

Thermal shock으로 인해 절단면에 미세균열이 형성되는 것을 방지하기 위해서 super 펄스를 사용하며, 두꺼운 stainless steel 절단의 경우 용융온도가 높은 Cr 산화물을 제거시키는데 super 펄스 기능을 활용하면 효과적이다.

Super 펄스와 cw가 조합된 방식은 두꺼운 알루미늄(8mm)절단에 효과적으로 사용되는데, 알루미늄은 열전도가 크고 산화물의 조직이 치밀하고 용융점이 높으므로 cw로 충분한 에너지를 공급하고, super 펄스로 산화막을 파괴시켜 타 작동방식

에서 얻을 수 있는 좋은 절단효과를 얻을 수 있다.

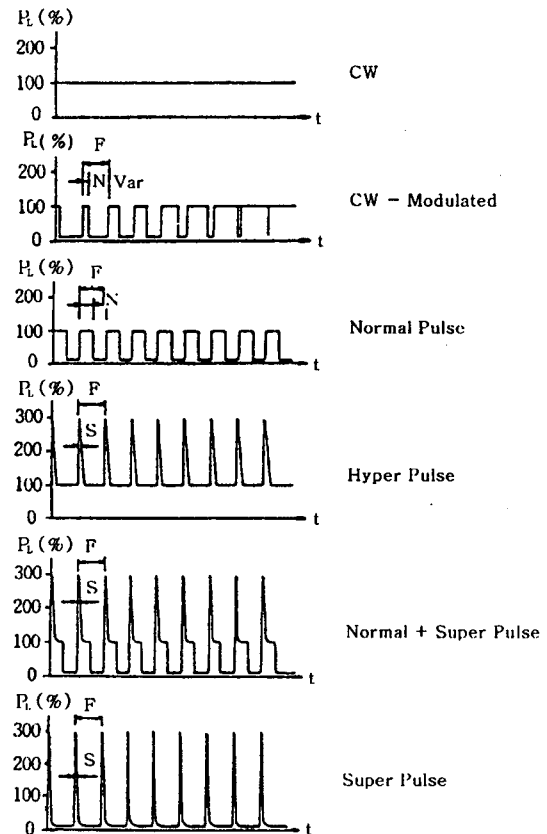


그림 6. 레이저 작동 방식 (power modulation)

③ 레이저출력

최고 절단속도와 절단두께는 레이저 출력으로 결정된다. 출력에 따른 절단속도가 재질두께에 따라 (그림 4)에 표시되어 있다.

④ 빔 quality

빔 quality는 mode, 출력의 밀도(intensity) 그리고 시간에 따른 안정성(temporal stability)으로써 표시될 수 있다.

TEM mode는 빔의 intensity분포를 나타낸다. Mode를 간단하게 설명하기 위해 박판의 진동을 예로들어 보면 아래 나타난 여러 형태의 mode를 이해하기 쉬운 것이다.

우선 박판이 표면에 수직방향으로 진동할 경우 여러 형태가 있을 것이다. 우선 TEM_{00} 에서와 같이 중앙부분이 가장 큰 진폭을 갖고 진동할 경우를 생각할 수 있고 TEM_{10} 에서와 같이 ring모양으로 정지된 부분이 있어 중심과 가장자리 부분만 진동할 경우, TEM_{20} 에서는 2개의 ring부분이 있는 경우 등을 생각할 수 있다. Mode number가 커질수록 수렴성(focusing)은 저하되며, 따라서 초점에서 얻을 수 있는 빔의 intensity가 저하된다. 또한 같은 크기의 초점 크기일지라도 mode number가 큰 빔은 초점심도(focal depth)가 작아 두꺼운 판재의 경우 절단면이 재료표면에 수직으로 형성되기가 어렵다(그림 7, 8).

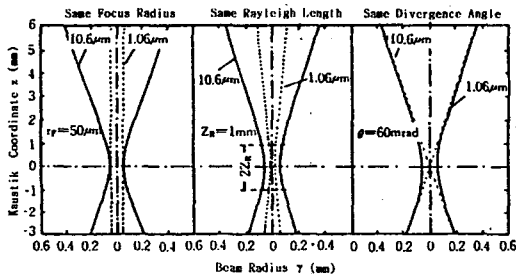


그림 7. CO₂ 레이저 빔과 Nd:YAG 레이저 빔의 수렴성 비교

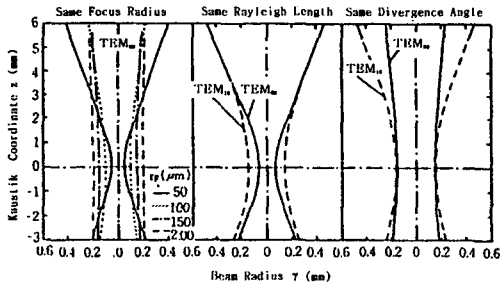


그림 8. TEM_{00} 와 TEM_{10} 의 수렴성 비교

⑤ 출력밀도(intensity)

Intensity는 재료가공에서 중요한 변수 중의 하나이다. Intensity는 절단 속도와 가공 효율에 영향을 준다. 레이저 절단시 필요한 출력밀도 ($10^6 W/cm^2$)를 가공표면에 얻기 위해서는 거울 또는 렌즈를 사용하여 초점을 맞춘다. 렌즈 초점거리, mode number, 파장 등과 초점 형성과의 관계는

이미 앞에서 설명됐으므로 여기서는 반복을 피한다.

빔 quality에서 시간에 따른 출력변화 또한 가공에 영향을 미친다. 따라서 가공결과에 따른 원인 분석을 위해서는 빔 진단장치(diagnostic system)가 필요하다. 레이저 절단이 실제로 있어 출력변동폭이 $\pm 5\%$ 이내인 경우는 그 영향을 직접 가공결과에서 인지할 수 없음이 밝혀져 있다.

⑥ 초점위치

초점의 위치는 재료표면에서 내부로 두께의 1/3 위치에 들 때 평행한 절단면을 얻을 수 있다고 밝혀져 있다. 그러나 이것은 충분한 intensity가 재료표면에 형성되었다는 것을 전제로 한다.

적절한 초점위치는 다른 변수(parameter)에 의해 변할 수도 있음을 언급하고 싶다. 초점이 재료표면에 있을 때 또는 상부에 위치했을 때 좋은 절단결과를 얻는 수도 있다.

초점의 위치는 lens가 열 또는 절단가스(cutting gas)의 압력으로 때에 따라서는 수 mm까지 변하는 수도 있다. 따라서 정밀한 금속거울을 절단에 사용하는 것이 바람직하다. 현재 lens에 못지 않은 정밀한 금속거울이 시판되고 있다(Zeiss).

⑦ 편광과 입사각(polarization & incidence angle)

편광방향에 따라 절단효과가 차이가 난다고 하는 것은 이미 알려져 있다(그림 9, 10). 편광에는 선형(linear), 원형(circular) 편광이 있다. 선형편광은 공진기(resonator)구조에 의해 생겨나며, 따라서 편광성이 없는 (statistical unpolarized) 빔을 발생시키는 resonator도 있다. 상용으로 사용되는 CO₂ 레이저에서 선형편광은 편광방향에 따른 resonator 내부 금속 거울에서의 반사율 차이 (그림 9)로 인해 생겨나며 절단시 위에서 언급한 차이 때문에 phase retarder를 사용하여 circular polarization으로 바꾼다.

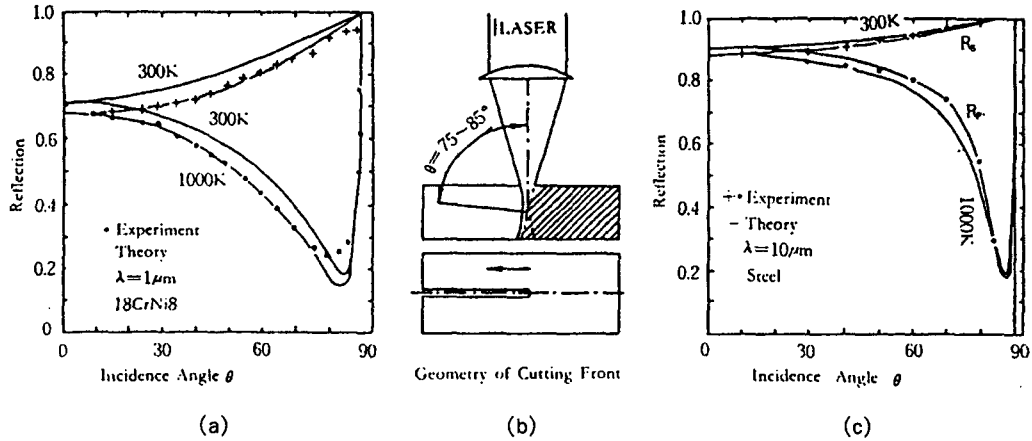


그림 9 (a) 입사각에 따른 반사율($\lambda = 1\mu\text{m}$), (b) Cutting front에서의 입사각, (c) 입사각에 따른 반사율($\lambda = 1\mu\text{m}$)

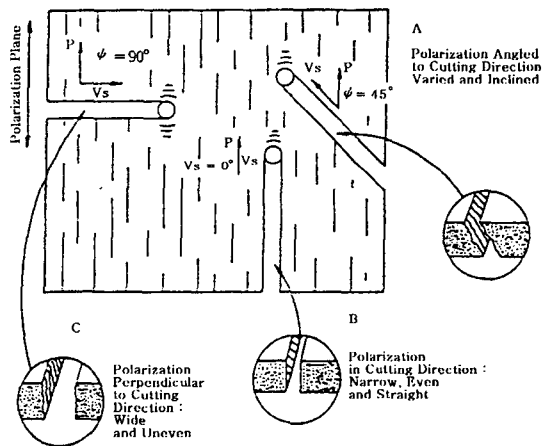


그림 10. Polarization 방향에 따른 절단성

편광방향에 따라 절단속도뿐 아니라 절단면의 기하학적 형상도 영향을 받는다. 이같은 영향들은 빔의 입사각, 즉 절단선부와 빔이 이루는 각이 $75^\circ \sim 85^\circ$ 이며 이때 R_s 와 R_p 의 차이가 대단히 큰 관계로 생긴다.

나. 절단속도

절단면 quality와 절단속도간의 정성적인 관계에서 언제나 일정한 규칙이 있다. 즉 적정절단속도는 최고 속도보다 낮은 곳에 위치한다는 사실이다(그림 11).

이와 같은 현상을 절단방향, 즉 절단선부에 형

성되는 온도구배의 차이로 인한 것으로 설명이 된다. 절단 속도가 느릴 경우, 온도구배가 완만하여, 절단선부 용융 slag/금속모재(고체)에 이르는 범위가 커지게 된다. 따라서 절단가스의 운동량(momentum)에 의해 제거되는 범위 또한 크게 된다.

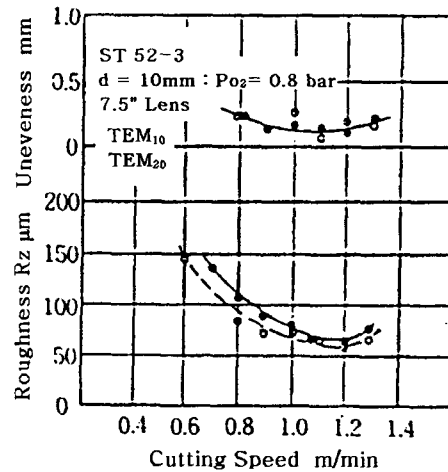


그림 11. 절단속도에 따른 절단면 거칠기와 평행도

이상적인 절단면을 얻기 위해서는 slag의 점도가 낮고, 즉 온도구배가 높아서, slag의 제거가 용이해야 한다. 온도구배가 낮은 경우에는 slag의 점도보다 용융 금속의 점도가 낮아 용융 금속부위가 절단가스에 의해 제거되므로, 동시에 절단폭도

넓어지므로, 절단면 quality가 저하 되고, 절단폭도 커지게 된다. 절단속도가 과도하게 빠르면 slag/용융금속이 절단하부에서 제거된 흔적이 남게 되어 결국 표면조도가 저하되는 결과를 낳는다. 즉 이 때는 온도구배가 너무 급격하게 형성돼 응고가 그만큼 빠르게 되어, 표면장력으로 인한 보상이 이루어지지 않게 된다. 또 과도속도 범위에서는 slag/용융 금속이 균일하게 제거되지 못하고, 불안정(unstable)하게 되어 품질의 저하를 초래하기도 한다.

다. 절단가스의 영향

절단가스(cutting gas)의 영향은 물리적, 화학적 그리고 유체역학적인 것으로 분류될 수 있다. 절단가스 성분에 의해 화학적 반응이 결정되고, 절단가스의 열전도와 비중, 그리고 가스와 slag사이의 표면장력 등이 slag의 유동성에 영향을 주며, 가스, jet의 압력과 분출형상은 slag의 제거에 영향을 준다.

① 화학적인 특성

연소절단에 있어서 발열반응(exothermic reaction)은 절단가스의 화학적 조성에 영향을 받는다. 연소점(ignition temperature)이상에서 금속은 산소와 격렬하게 반응하며, 이때 생성되는 열은 절단효과를 향상시킨다. 이러한 발열반응에서 생성되는 열량은 절단에 소요되는 총열량 중 거의 70%를 차지한다.

② 물리적 특성과 동적 에너지(physical properties & kinetic energy)

절단가스의 물리적 특성과 동적 에너지는 slag의 제거와 관련이 있다. 가스의 비중이 클수록 가스 jet의 im펄스 전달이 효과적으로 되며, im펄스 전달은 가스의 속도가 클수록 또한 크게 된다. 가스 jet의 속도는 nozzle의 형상과 압력에 의해 결정된다. 가스의 열전도성은 얇은 박판의 경우 고

려되지 않으나 두꺼운 재료에 있어서는 절단효과에 영향을 준다.

라. 절단 head의 영향

Cutting head의 구조는 작업의 수행과 반복성에 많은 영향을 준다.

Cutting head가 갖춰야 할 사항들은 기계적인 안정성, 광축(빔 axis)에 맞게 조절하는 기능 및 거리조절 기능, 가스의 밀폐성, 특히 중요한 것은 거리조절 기능으로, 이는 절단이 용이하지 않는 금속을 절단할 때 정확한 거리조절이 필요하기 때문이다.

Cutting head는 통상 높이(거리)조절장치, 초점 lens 또는 거울, 절단 가스공급로 그리고 nozzle의 조합이다.

① 높이조절

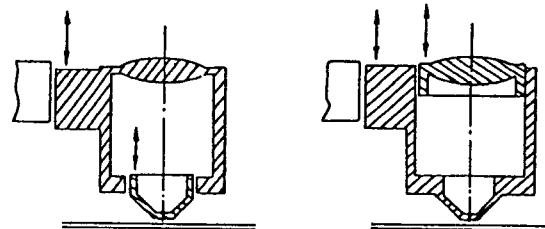


그림 12. Cutting head의 높이조절 기능

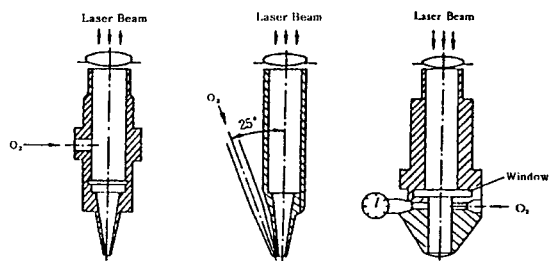


그림 13. 절단가스 공급 방법

높이조절은 두 가지의 방법으로 할 수 있다(그림 12). 이 두가지 방법을 조합해서 사용 하는 수도 있다. 이 경우 기계적 안정성이 감소된다. 왼쪽의 경우 lens가 안정되어 있고, 오른쪽의 경우 nozzle이 큰 안정성을 갖는다.

② 수렴장치(focussing optics)

빔을 수렴하기 위해 lens 또는 거울을 사용한다. 이때 lens 또는 거울이 쉽게 교환이 가능하고, 장기간에 걸쳐 위치의 변화가 없도록 주변장치가 설계되어야 한다.

lens를 사용하는 경우, 광이 nozzle의 중심부를 통과하도록 쉽게 조절이 가능하나, 거울을 사용할 경우 lens와 같이 쉽지는 않다. 절단 가스의 압력은 lens 또는 window(거울 사용의 경우)에 직접 전달되어, 최고 압력은 이들 재질의 강도에 따라 결정된다.

③ 절단가스 공급

절단가스 공급 방법에는 3가지 종류가 있다(그림 13). (a)의 경우 최고압력은 lens의 강도에 따라 결정되고, (b)의 경우 초점의 위치와 가스 jet의 작용위치가 정확하게 조정되어야 하며, (c)의 경우 절단가스의 압력이 직접 lens에 작용하지 않고 ZnSe window에 작용한다. Window의 지름이 작음으로 인해 큰 압력을 견딜 수 있으나 높은 밀도의 출력이 작용하므로 바람직하지 않다. (b)의 경우도 곡선을 절단하는 데에는 적합하지 않다.

최근에는 절단 가스를 경사지게, nozzle 방향으로 공급함으로써 lens에 걸리는 부하를 낮추는 방법도 있으며, 또는 두꺼운 lens를 사용해 (a)의 경우 1.5MPa까지 절단 가스의 압력을 높이기도 한다.

마. Cutting nozzle의 영향

Cutting nozzle은 연속적으로 균일하고 효과적인 가스 jet의 kinetic energy를 절단부에 작용 시켜 slag이 효과적으로 제거되도록 하는 역할을 한다. 이때 nozzle의 직경, 재료와의 거리, nozzle 형상 등이 변수로 고려된다.

① Nozzle직경

레이저 빔과 가스가 동축인 경우 nozzle의 직경

은 빔이 접촉하지 않고 통과되도록 충분히 커야 한다. nozzle의 직경에 관해서는 여러 가지 상반되는 연구결과가 나와 있으나, 결과적으로 다른 변수와 상호연관을 갖음으로 해서 일반적으로 직경의 크기를 결정할 수 없고 경우에 따라 결정될 성질이라고 본다. 단지 가스의 소모측면에서 볼 때 과도하게 큰 nozzle은 바람직하지 않으므로 통상 ϕ 1mm이하가 사용된다.

② Nozzler과 재료와의 거리

거리는 가능한 가까울수록 좋다.

거리가 가까우면 가스 jet의 kinetic energy의 손실이 그만큼 작아진다. 피가공물의 평면도를 고려하여 통상 1mm 이내로 한다.

바. 재료의 영향

절단성은 재료의 특성에 상당히 큰 영향을 받는다. 중요한 특성으로는 산소와의 친화력, 열전도를 그리고 흡수율을 든다.

① 산소와의 친화력 : 연소절단의 경우

합금을 절단할 경우 합금원소들이 갖는 산소와의 친화력의 차이에 의해 선택적으로 산화, 연소가 일어난다. 즉 각 합금원소가 동시에 산화, 연소되지 않고 친화력이 높은 순으로 반응이 일어난다.

Stainless강을 절단할 때 합금원소인 Cr은 Fe또는 Ni보다 산소와의 친화력이 높아 다른 원소보다 Cr산화물을 생성한다. 따라서 slag의 조성에서 Cr산화물의 백분율은 모재에서 Cr이 차지하는 비율을 훨씬 상회한다. 반면에 Ni은 친화력이 낮음으로 인해 산화, 연소반응에서 Cr이나 Fe보다 낮은 비율로 산화, 연소물을 생성시키므로 slag에서 Ni의 비중은 모재에서 보다 매우 낮다, 즉 반응 속도가 느려 절단면 부근에 많은 부분이 잔류하게 된다.

이와 같은 현상은 절단성에 직접적인 영향을 미

치는데 이유는 Cr의 산화물인 Cr_2O_3 의 용융점이 모재의 용융점보다 높고, Fe, Cr, Ni의 산화물로 된 slag의 점도 및 표면장력을 크게하여 slag가 원활하게 가스 jet에 의해 제거되지 않기 때문이다. slag가 원활하게 제거되지 않음으로 인해, 즉 산소와 모재 (cutting front에서) 사이의 거리(slag의 두께)가 커지게 되어 연소 반응속도가 느려지게 되고 따라서 절단속도가 저하되는 결과를 낳는다. 이뿐 아니라 slag의 용융점이 결과적으로 모재의 용융점보다 높게 되어 slag와 slag 사이에서 erosion이 일어나지 않고 melt 내에서 erosion이 일어나 절단면은 매끄럽지 못한 결과를 낳는다. 이러한 난점을 어느정도 극복하기 위해서는 펄스를 사용하여 heat input을 조절하는 것도 한 해결방안이다.

알루미늄 절단의 경우 산화물인 Al_2O_3 의 용융점이 모재의 용융점($660^{\circ}C$)보다 훨씬 높은 $2030^{\circ}C$ 에 달하고 Al_2O_3 는 매우 치밀한 산화막을 형성하므로 절단이 순조롭게 진행되지 않는다.

② 열전도율

실제 절단작업에 사용된 energy는 총 가해진 energy에서 손실(주로 열전도에 의한)을 뺀 양이다. 열전도율이 높은 금속일수록 절단효율은 저하된다. 따라서 그만큼 많은 energy를 가해야 한다. 열전도율이 높은 금속으로 Cu와 Al은 또한 레이저 빔의 흡수율이 낮아 효율이 낮다.

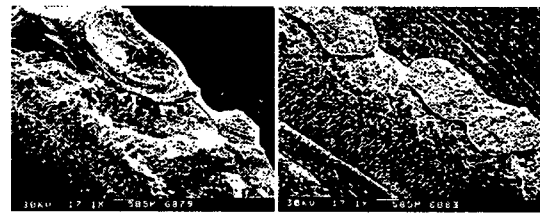
4. 합금원소가 절단에 미치는 영향

강재절단에 있어 재료에 함유된 합금원소는 절단성에 영향을 미친다. 스테인레스강을 절단해 본 경험을 갖춘 사람은 열강절단시 보다 속도도 느리고 절단면도 다소 거칠다는 것을 이미 알고 있다(그림 14(a,b)). 이밖에 구리, 알루미늄 등도 절단이 용이하지 않지만 이 경우에는 이들 금속의 레이저빔 반사율이 높고, 열전도율이 높은 관계로 절단효율이 낮아지기 때문이다.

일반적으로 스테인레스강은 수요가 점차 늘어가는 추세이고 따라서 절단의 필요성도 증대되어가므로 스테인레스강의 레이저 절단성향상은 중요하게 부각되어 온다. 절단성을 향상시키기 위해 우선 절단공정(process)을 이해하는 것이 전체가 된다.

절단과정은 세분하면 첫째 레이저빔 흡수, 둘째 화학적 반응 (연소 $Me + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MeO - \Delta H: \Delta H$ 반응열), 셋째 산화물/연소물 제거(산소 jet에 의해), 3가지 공정(process)의 조합이다.

따라서 스테인레스강이 연강보다 절단성에서 뒤진다고 하는 것은 3가지 공정 중에서 최소 1개의 공정이 비효율적 이거나 느리게 진행됨으로 인해 전체 공정진행이 순조롭지 못하게 됨과 마찬가지로 본다.



(a) 침식 (b) 드로스 부착

그림 14. 스테인레스강의 레이저 절단면

4.1 원소 함유량에 따른 흡수율 변화

합금, 즉 두 개 이상의 원소가 합쳐진 금속은 격자의 주기가 엄격히 일정치 않고, 이로써 적외선 영역의 레이저 빔 ($\lambda=10.6\mu m$)의 흡수율이 상승된다. (표 1)은 $10.6\mu m$ 파장의 레이저 빔에 대한 몇 가지 금속의 흡수율 및 기타 thermophysical property를 나타낸 것이다.

(표 1)에서 보듯이 타원소의 양이 증가할수록

표 1 Thermophysical and optical properties

Property 재질	C_p (J/g.k)	θ (J/cm.s.k)	μ (%)
Fe(0%Cr)	0.440	0.670	4.8
Fe(0.5%Cr)	0.440	0.628	6.7
Fe(1%Cr)	0.444	0.502	8.4
SUS 304	0.498	0.138	12.0

C_p : 비열, θ : 열전도율, λ : 흡수율

흡수율은 증가하고, 이와 반대로 열전도율은 감소하는 경향이 있다. 따라서 단순히 energy balance 상으로 레이저 절단효율을 판단하면, SUS 304재질이 단연 우수할 것이라는 추측이 든다. 그러나 실제에서는 반대경향이 있으므로 흡수율에 의한 영향은 이 경우 절대적인 것이 아님이 명백하다.

4.2 화학적 반응(연소) 및 slag(산화물)제거

레이저(연소)절단은 산소 flame 절단과 유사하다. 단지 열원으로 산소-아세틸렌 불꽃 대신 레이저 빔을 사용한다.

산소 flame절단에 대한 연구는 이미 1930년대부터 보고되기 시작했으므로 많은 연구결과가 발표돼 있다. 따라서 산소 flame 절단의 풍부한 연구결과를 레이저 절단에 참고로 하는 것도 효율적이다.

우선 산소 flame 절단에는 기본적인 3가지 조건이 만족되어야 한다.

- ① 산소 jet에 의해 연속적인 연소가 일어나야 한다.
- ② 절단부에서 발생하는 산화물의 용융점이 모재의 용융점 보다 낮아야 한다.
- ③ 발화온도(ignition temperature)가 모재의 용융점보다 낮아야 한다.

이같은 조건을 만족시키는 철합금에서 합금원소의 최고 허용량은 (표 2)와 같다.

스테인레스강은 Cr함유량이 13%이상이므로 산

표 2 철합금 중 합금원소의 최고 허용량

원 소	허 용 량
탄소	1.6%
Silicon	2.5%(0.2% C에서)
망간	13.0%와 1.3% C
크롬	1.5%
텅스텐	10.0%와 5.0% Cr, 0.2% Ni, 0.8% C
니켈	7.0%, 35%와 0.3% C
몰리브덴	0.8%
구리	0.7%

소 프레임으로는 절단이 불가능하다. 이는 실제로 절단을 시도해 보면 알 수 있듯이 연소가 일어나지 않고 간헐적으로 모재가 용융되어, 용융금속이 제거됨으로써 사용불가능한 절단면이 생긴다. 반면에 레이저 빔을 사용하면 이에 비해 훨씬 좋은 절단면을 얻을 수 있다. 즉 절단이 가능하다. 이러한 차이는 열원의 차이에서 오는 것으로 레이저 빔은 절단선부(cutting front)에 직접 흡수되면서 열에너지로 변환되기 때문이다. 산소프레임의 경우에는 프레임의 intensity가 낮고, 재료표면에 작용하기 때문에 효과적인 연소가 일어나지 않는다.

가. 산소 프레임 절단에서 연소현상

산소 프레임 절단의 모재의 일부를 점화온도 이상으로 예열한 후 강한 산소 제트(Jet)로 연소시키며 동시에 연소물 제거를 함으로써 절단이 이루어진다.

예열과정은 모재의 두께에 따라 차이가 있지만 flame의 intensity가 낮은 관계로 레이저에 비해 서서히 진행된다. 예열과정 중 Cr은 표면으로 확산(diffusion)되며 Cr₂O₃는 매우 치밀하고 고온(2265℃)에서 용융되므로 예열과정에서 고체로 유지되고, 시간이 경과되어 온도가 상승됨에 따라 산화물층 밑의 모재가 용융(약 1550℃)된다. 이와 같은 현상으로 인해 Cr이 함유된 합금의 절단은 불가능하다. 예열 시간을 짧게 (고밀도 에너지빔 이용)하여 Cr의 확산을 감소시키면 절단이 가능하다.

연강의 경우 Fe는 FeO로 우선 산화되며 Fe₃O₄로 일부 변한다. FeO는 용융점이 낮고(1130℃)점성이 낮아 절단에 유리한 조건을 갖추고 있다.

(그림 15)는 절단 원리를 나타낸 것으로 산소와 모재(연강)는 직접 접촉하지 않고 slag (FeO)에 의해 차단되어 있다. 연소현상은 Fe가 이온의 형태로 slag층을 통과해 산소와 결합함으로써 이루어진다. 따라서 slag층이 얇으면 얇을수록 절단속도는 증가된다. 즉 slag의 점성이 낮아 산소 jet에 의

해 용이하게 제거되면 연소반응의 양이 증가되고 따라서 절단속도도 증가 되는 결과가 된다.

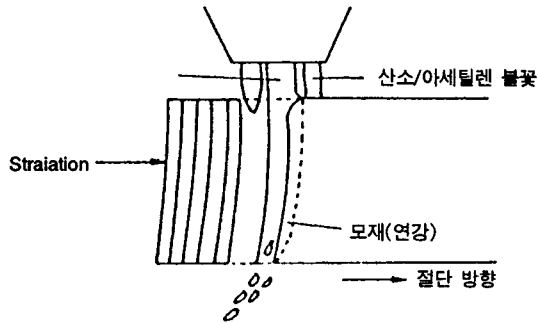


그림 15. 산소 프레임 절단 원리

다시 Cr에 대해 언급해보자. 모재에 Cr이 함유되면, Cr은 산소와 친화력이 커서 Fe보다 더 많은 양이 slag층을 통과하여 산소와 결합한다. Cr의 산화물은 언급했듯이 용융점이 높으므로 결과적으로 $FeO+Cr_2O_3$ slag의 용융점은 FeO보다 높고 점도 또한 상승한다. 따라서 산소 jet에 의해 slag이 쉽게 제거되지 않으므로 절단성은 저하된다. Cr의 양이 15%이상되면 절단현상은 중지되는 결과를 가져온다.

산소와 모재가 직접 접촉하지 않고 중간에 slag층을 통해 연소가 일어난다고 하는 사실은 절단면의 탄소 적체현상으로 규명된다. 만약 직접 접촉이 일어나면 탄소는 선별적으로 산소와 결합하여 탄소 적체가 아니라 그 반대 현상이 생길 것이다. 그러나 FeO층이 격리하고 있으므로 탄소는 FeO층을 통과할 수 없어 잔류하게 된다.

나. 레이저 절단에서 연소현상

레이저빔을 사용할 경우, 근본적인 연소현상의 차이점은 없다. 레이저빔은 고밀도 에너지를 절단 선부에 직접 공급함으로써 점화온도 이상으로 유지시키며, 고용융점의 slag의 유동성을 향상시켜 산소 flame절단이 불가능한 합금도 절단이 가능하게 한다.

앞에서 언급했듯이 Cr이 함유된 금속절단시 Cr

이 Fe보다 많이 산소와 결합하는 현상을 선별연소(selective oxidation)이라 하며, 이로 인해 결국 합금강의 절단이 용이하지 않다. (그림 16)은 레이저로 절단된 X8Cr17합금의 절단면 부위에서 Cr 함량의 변화를 나타낸 것이다. 모재에서 slag에 이르는 동안 Cr은 용융층에서 감소되며, slag에서 증가된다. 이같은 현상은 절단 속도가 느려질수록 심화된다.

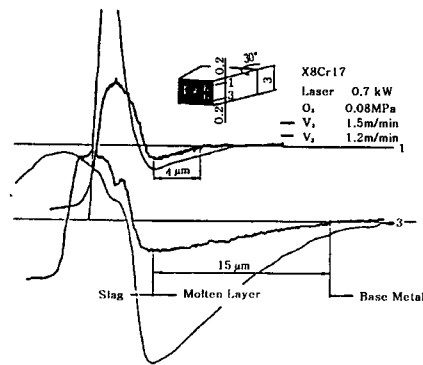


그림 16. Cr 함량의 변화 (X8Cr17)

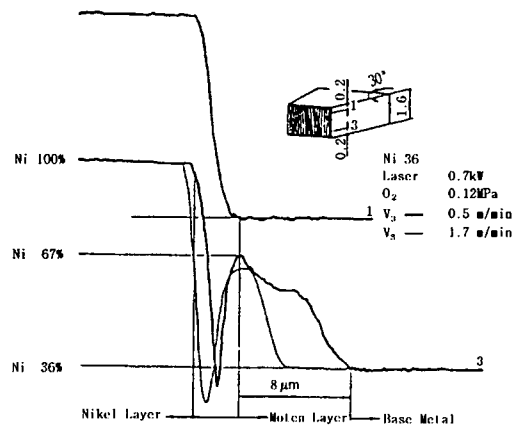


그림 17. Ni 함량의 변화 (Ni36)

(그림 17)는 철에 Ni36%가 함유된 소위 invar의 절단면에서 Ni함유량의 변화를 나타낸 것으로 (그림 16)의 Cr의 경우와는 반대로 용융층에서 Ni의 양은 증가하고 slag에서는 감소한다. 여기에서도 절단속도에 따라 차이가난다.

절단면 상부와 하부에서의 차이는 다음과 같이 설명될 수 있다.

절단면 상부에서는 slag층이 얇으므로 연소현상이 급격히 일어나는데 반해 하부로 갈수록 slag층이 두꺼워져 연소에 걸리는 시간이 길어지고 따라서 선별 연소현상이 심화된다. 절단속도의 차이에 의해서도 선별연소의 심화도가 차이가 나는 것은 이를 뒷받침한다.

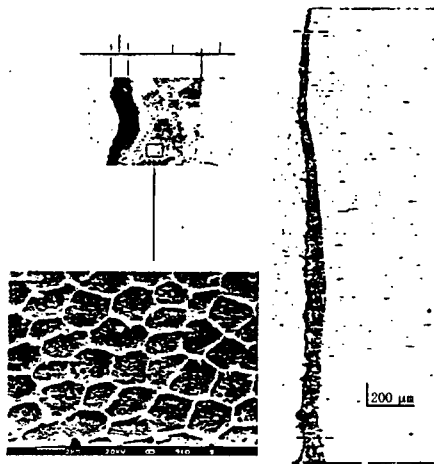


그림 18. 절단면의 미세조직(X5CrNi189)

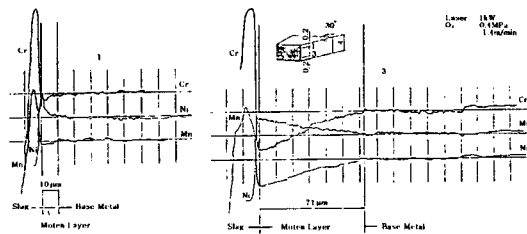


그림 19. 합금원소 함유량의 변화

Cr과 Ni이 함유된 X5CrNi189(Cr18%, Ni9%, 0.05%, rest Fe)스테인레스강의 경우에도 유사한 현상이 일어난다. (그림 18)는 X5CrNi189의 절단면의 미세조직을 나타내고, (그림 19)은 (그림 18)에 표시된 부분에서 원소의 분포를 나타낸다.

선별 연소현상은 절단공정에 중대한 영향을 미친다. 선별 연소현상은 위에서 보듯이 두께가 두꺼울수록 절단속도가 느릴수록 심화된다. 선별 연소가 과도해지면 slag의 용융점이 상승되고, 점도가 커져 산소 jet에 의해 slag가 침식(erosion)되지 않고 모재 용융부가 침식되는 경우도 있다. (그림

20)은 이를 증명하는 것으로 slag 내부에 밝은 색의 금속입자들이 slag의 유동방향으로 나열돼 있다.

이러한 금속균은 절단면 하부에서 용융부가 침식되어 나타난 결과로 설명될 수밖에 없다.

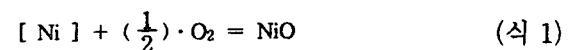


그림 20. 절단하부에서 용융금속의 침식(X8Cr17)

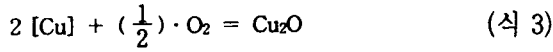
4.3 선별연소현상(selective oxidation)

선별 연소현상은 ①평행상태, ②산화물층 밑에서 반응이 일어나지 않는다는 조건에서 정량적으로 규명할 수 있다.

연소절단에서는 물론 평행상태가 이루어지지 않는다. 그러나 모든 반응이 평행상태로 가기 위한 과정이듯이 평행상태를 이루기 위한 방향으로 이루어진다. 이러한 과정을 진행시키는 원동력은 free energy의 차이이다. Cu-Ni합금의 경우를 들어 이 같은 free energy의 변화를 살펴본다. 산화물 Cu₂O와 NiO는 서로 결합하지 않으므로 조건 ②를 만족한다. 산화도중 free energy의 변화는 (식 1)에서 (식 4)까지로 표시된다.



$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \cdot \ln [P(O_2)^{\frac{1}{2}} \cdot X_{Ni}] \quad (\text{식 2})$$



$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \cdot \ln [P(O_2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - X_{Ni})^2] \quad (\text{식 4})$$

여기에서 ΔG : free energy 변화량, X_{Ni} : Ni의 molfraction, $(1-X_{Ni})$: Cu의 molfraction 대기압에 해당되는 0.1MPa(1bar)의 산소분위기에서 (식 2)와 (식 4)로부터 각각

$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \cdot \ln X_{Ni} \quad (\text{식 5})$$

$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \cdot \ln(1-X_{Ni})^2 \quad (\text{식 6})$$

을 얻는다. 산소친화력(affinity)은 이로써 온도와 성분함량의 함수로 표시됐다.

각 원소의 산소친화력은 free energy의 차이가 동일할 경우 같게 된다.

이 경우 선별연소/산화현상은 일어나지 않는다. 즉

$$\Delta G_0(NiO) - RT \cdot \ln X_{Ni} = \Delta G_0(Cu_2O) - RT \cdot \ln(1-X_{Ni})^2 \quad (\text{식 7})$$

로 표시되며 $\Delta G_0 \approx \Delta H_0 - T \cdot S_0$ 관계를 이용해 X_{Ni} 를 (식 7)에서 (식 8)과 같이 산출한다.

$$\ln \left[\frac{(1-X_{Ni})^2}{X_{Ni}} \right] = 4022/T - 1025 \quad (\text{식 8})$$

$T=1000K$ 일 경우, $X_{Ni}=0.0017$ 값을 얻는다. 이는 다음과 같이 해석한다.

Ni는 Cu보다 높은 산소친화력으로 인해 Ni의 함유량이 0.17%가 될 때까지 Ni만 산화된다. Cu는 Ni이 0.17%이하 함유돼 있어야 이 온도($T=1000K$)에서 산화될 수 있다. (식 1)에서 (식 8)에 이르는 과정을 Cr과 Fe합금의 경우에 적용하면 (표 3)와 같은 결과를 얻는다.

(표 2)에서 보듯이 온도가 상승하면 Cr의 임계함량도 상승한다. 즉 고온으로 갈수록 Cr의 선별연소현상은 약화된다. Cr이 17% Fe가 83%함유된 합금의 경우 절단선부의 온도가 3089K이면 Cr과 Fe가 동일한 산소 친화력을 갖고 모재의 함유량을 유지한 채 연소되는 결과를 갖는다. 절단선부

의 온도가 2000K일 경우 모재의 17%Cr은 Fe보다 우선 연소되어 Cr의 함유량이 1.9%까지 감소한 후에야 비로소 Fe가 연소되기 시작한다.

표 3 Cr+Fe합금에서 선별연소가 일어나지 않는 온도에 따른 성분함유량

Temp.K	Cr%	Fe%	Temp.K	Cr%	Fe%
2000	1.9	98.1	2200	3.5	96.5
2400	6.0	94.0	2600	9.0	91.0
3000	15.6	84.4	3089	17.0	83

5 절단성 향상방안

합금, 구체적으로 Cr이 함유될 경우 선별연소현상을 억제해야 한다. 선별연소현상은 원소간 산소친화력의 차이로 인한 확산속도의 차이로 나타나므로 이에 대한 대책을 강구한다. 즉 주어진 금속을 절단할 때 확산을 좌우하는 시간과 온도를 조절하면 될 것이다. 온도가 높을수록 선별연소현상은 감소되고 시간이 짧을수록 확산량은 감소되므로 레이저 빔을 펄스형태로 한다.

매 펄스마다 일정범위를 순간적으로 가열하여 연소시키고 연소물을 제거한다. 이로써 slag에서 모재에 이르는 온도구배는 급격하게 되고 반응시간은 짧아져 선별연소가 감소된다.

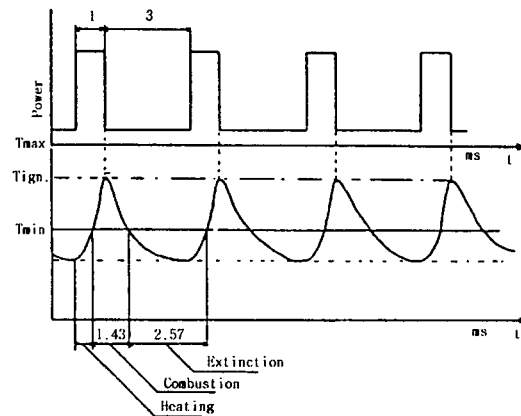


그림 21. 펄스로 인한 출력변화에 따른 절단선부의 온도 변화

연속파의 경우 slag가 제거되지 않은 상태에서 계속적인 빔 에너지 흡수로 용융부층의 두께는 확대되어 Cr의 확산량은 증가되고 slag의 점도는

증대되어 결국 용융부 침식이 일어난다. 이러한 관찰은 고속도 카메라 (10,000Frame/sec)로 절단선 부를 촬영하여 얻은 것으로 절단시 slag의 유동을 연구하는데 좋은 information을 제공한다.

펄스를 사용할 경우 연소는 펄스 작용시간보다 약간 길었으며, 다음 펄스까지는 연소가 중지된다. Slag의 유동속도는 연속파의 경우보다 3~4배 빠르게 관찰되었고 상부에서 하부로 이르는 전 구간에서 연소가 동시에 일어난다.

이러한 관찰은 (그림 22)의 결과에서도 볼 수 있다. 펄스를 사용했을 경우 연속파보다 효과적

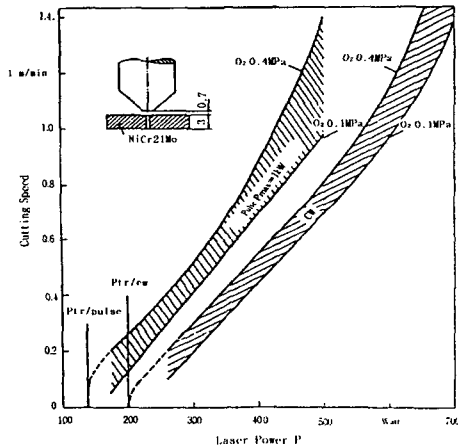


그림 22. cw 또는 펄스경우의 출력에 따른 절단 속도

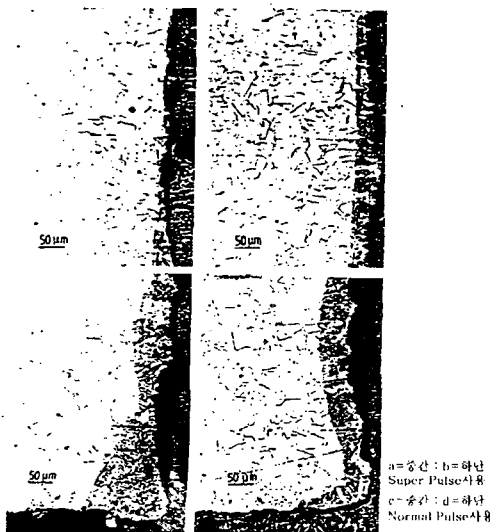


그림 23 절단면 미세 조직

으로 절단할 수 있다. 이같은 현상은 단순한 thermal energy balance를 이용한 절단속도 예측이론은 적용범위가 연속파의 일부 금속에 한정되리라 본다.

펄스에는 normal과 super 펄스가 있음은 설명했다. 첨두출력이 평균출력에 3~4배 높은 super 펄스를 스테인레스강 절단에 사용하면 절단면 품질이 향상된다. 이는 (그림 23)에 나타난 절단면에서 합금원소의 분포를 측정된 결과 (그림 24)로 볼 때 선별연소의 감소로 인한 절단성향상으로 볼 수 있다.

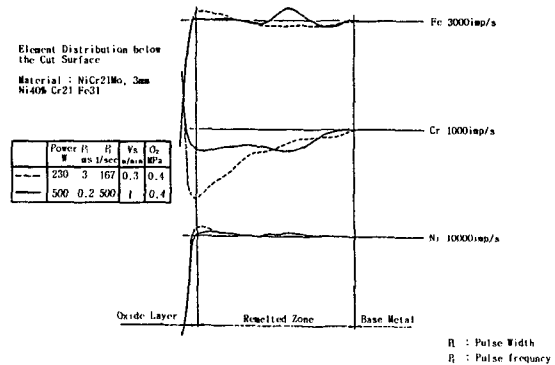


그림 24 그림 10의 절단 부분에서 합금원소 함량의 변화

참고문헌

1. Pepperhoff, A : Das optische Verhalten von Metalloberflächen. Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Umschau Verlag Frankfurt 1969
2. Mineta, S. et al. : Measurement of thermophysical properties and absorptivity by CW-CO₂ 레이저 heating. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng 17 (1983)H3
3. Han Y. H, Decker, I. and Ruge, J. : 레이저 cutting of selected steels : micro structural changes and their effect on the mechanical properties. : European conference on 레이저 Treatment of Materials 25-26 sept. 1986, Bad Nauheim(FRG).